

ПЕРСПЕКТИВИ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ РИЗИКИ ПРОЦЕСУ БІОКОНВЕРСІЇ ОРГАНО-МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ З МУЛОВИХ ВІДКЛАДІВ ЗАНЕДБАНИХ МЕЛІОРАТИВНИХ СИСТЕМ

Легенчук Роман Васильович,

здобувач відокремленого підрозділу «Науковий ліцей»
Державного університету «Житомирська політехніка»
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3240-8719>

Циганенко-Дзюбенко Ілля Юрійович,

доктор філософії (Екологія), в.о. завідувача кафедри наук про Землю,
вчитель біології відокремленого підрозділу «Науковий ліцей»,
Державний університет «Житомирська політехніка»
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3240-8719>
Scopus Author ID: 59134642100

Скиба Галина Віталіївна,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри наук про Землю
Державний університет «Житомирська політехніка»
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4981-4975>
Scopus Author ID: 57188747584

Капець Надія Володимирівна,

Молодший науковий співробітник, Лабораторія ліхенології та бріології,
Інститут ботаніки імені М.Г. Холодного НАН України, м. Київ, Україна
Дністровський регіональний ландшафтний парк, м. Тлумач, Україна
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7970-8682>
Scopus Author ID: 57203911510

Стаття присвячена аналізу перспектив та технологічних ризиків біоконверсії мулових відкладів занедбаних меліоративних систем України у органо-мінеральні добрива. Розглянуто наукові підходи до комплексної характеристики субстрату через тріступеневу ієрархію досліджень: фізико-хімічну, агрохімічну та мікробіологічну оцінку сировини. Проаналізовано міжнародні дослідження ефективності біоконверсії органічних відходів, включаючи роботи з термофільними бактеріальними культурами *Bacillus thermoamylovorans* (67% редукції органічної речовини за 10 діб при 60°C), гідротермальної карбонізації з вищученням азоту з відкладів (6-8% сухої речовини), багатоступеневих анаеробних систем (підвищення продукції метану на 10-30%) та твердофазної ферментації з ризосферними бактеріями *Burkholderia cepacia*. Систематизовано результати польових випробувань біоконвертованих добрив у лентильно-кукурудзяній ротачії (підвищення мікробної біомаси вуглецю на 126%, азоту на 49%, зниження еволюції CO₂ на 25%). Представлено концептуальну технологічну схему біоферментації з контрольованими параметрами: вологість 50-60%, температура 50-65°C, pH 6,5-8,0, оптимальне співвідношення C:N 25-30:1, використання селекційованих штамів термофільних мікроорганізмів та контрольованої аерації. Визначено агроекологічні переваги технології: відновлення функціональності меліоративних систем, заміщення мінеральних добрив, покращення структури ґрунтів, пролонговану дію поживних речовин та зниження ризиків евтрофікації. Проведено системну класифікацію технологічних ризиків за трьома категоріями: мікробіологічні (патогенна контамінація, неповна біоконверсія), хімічні (біоаккумуляція важких металів, втрати поживних речовин) та технічні (нестабільність процесу, енергетичні витрати, сезонна варіабельність сировини). Запропоновано інтегровану систему управління ризиками на основі принципів HACCP з автоматизованими системами моніторингу та превентивним контролем критичних параметрів.

Ключові слова: біоконверсія, мулові відклади, органо-мінеральні добрива, меліоративні системи, технологічні ризики, екологічна безпека.

Lehenchuk Roman, Tsyhanenko-Dziubenko Illia, Skyba Halyna, Kapets Nadiia. Prospects and technological risks of the bioconversion process of organo-mineral fertilizers from sludge deposits of neglected reclamation systems

The article analyzes prospects and technological risks of bioconversion of sludge deposits from neglected reclamation systems of Ukraine into organo-mineral fertilizers. Scientific approaches to comprehensive substrate characterization through three-level research hierarchy are considered: physico-chemical, agrochemical and microbiological assessment of raw materials. International studies on organic waste bioconversion efficiency are analyzed, including works with thermophilic bacterial cultures *Bacillus thermoamylovorans* (67% organic matter reduction in 10 days at 60°C), hydrothermal carbonization with nitrogen extraction from deposits (6-8% dry

matter), multi-stage anaerobic systems (10-30% methane production increase) and solid-phase fermentation with rhizosphere bacteria *Burkholderia cenocepacia*. Results of field trials of bioconverted fertilizers in lentil-corn rotation are systematized (126% increase in soil microbial carbon biomass, 49% nitrogen increase, 25% CO₂ evolution reduction). A conceptual technological scheme of biofermentation with controlled parameters is presented: humidity 50-60%, temperature 50-65°C, pH 6.5-8.0, optimal C:N ratio 25-30:1, use of selected thermophilic microorganism strains and controlled aeration. Agroecological advantages of the technology are identified: restoration of reclamation systems functionality, mineral fertilizer substitution, soil structure improvement, prolonged nutrient action and eutrophication risk reduction. Systematic classification of technological risks by three categories is conducted: microbiological (pathogenic contamination, incomplete bioconversion), chemical (heavy metals bioaccumulation, nutrient losses) and technical (process instability, energy costs, seasonal raw material variability). An integrated risk management system based on HACCP principles with automated monitoring systems and preventive control of critical parameters is proposed. The review demonstrates high potential of sludge bioconversion technology for sustainable agricultural development while requiring comprehensive risk management strategies for successful commercialization.

Key words: bioconversion, sludge deposits, organo-mineral fertilizers, reclamation systems, technological risks, environmental safety.

Вступ. Сучасний аграрний сектор України перебуває в умовах постійного пошуку інноваційних рішень, які дозволили б одночасно підвищити ефективність виробництва та зменшити екологічний тиск на довкілля. Однією з гострих проблем залишається накопичення значних обсягів мулових відкладів у занедбаних меліоративних системах, що втратили свою функціональність через багаторічну відсутність належного догляду та обслуговування. Ці відклади містять велику кількість органічної речовини та мінеральних компонентів, проте в їхньому складі можуть бути присутні й токсичні елементи, включаючи важкі метали та патогенні мікроорганізми. Таким чином, вони виступають як екологічною загрозою, так і потенційно цінним ресурсом. Розробка технологій їх безпечної переробки з утворенням добрив є стратегічно важливим завданням для агроекономіки країни.

Наукова новизна даного дослідження полягає у комплексному підході до біоконверсії мулових відкладів з урахуванням трьох ключових складових: детальної характеристики сировини, оптимізації технологічних параметрів процесу та системного управління технологічними ризиками. На відміну від більшості існуючих робіт, де біоконверсія розглядається переважно з точки зору перетворення органічної речовини, у даній роботі застосовано інтеграцію знань з біотехнології, агрохімії, екології та інженерії біопроцесів. Це дозволило не лише створити ефективну технологічну схему, але й передбачити заходи, які забезпечують стабільну якість і безпечність кінцевого продукту при промисловому масштабуванні.

Впровадження технології біоконверсії мулових відкладів у виробництво орґано-мінеральних добрив здатне вирішити одразу кілька актуальних проблем. По-перше, це утилізація накопичених екологічно небезпечних відходів, що дозволить відновити функціонування меліоративних систем та зменшити забруднення водних екосистем. По-друге, заміщення частини мінеральних добрив орґано-мінеральними аналогами дасть можливість знизити собівартість аграрної продукції та зменшити залежність України від імпорту добрив, що особливо актуально в умовах нестабільної кон'юнктури світових ринків. По-третє, розвиток локального виробництва створить нові робочі місця в сільській місцевості та стимулюватиме розвиток зеленої економіки.

Метою роботи є визначення перспектив впровадження технології біоконверсії мулових відкладів занедбаних меліоративних систем у виробництво орґано-мінеральних добрив з урахуванням екологічних, агрономічних та економічних аспектів, а також ідентифікація й аналіз технологічних ризиків, що можуть виникати під час реалізації цього процесу. Досягнення мети передбачає виконання комплексних завдань: дослідження складу та властивостей мулових відкладів, розробка оптимальної технологічної схеми біоконверсії, оцінка ефективності та безпечності кінцевого продукту, а також створення системи управління ризиками.

Матеріали та методи дослідження. Дослідження базувалося на аналізі наукової літератури в базах даних Scopus, Web of Science та PubMed за 2018-2025 роки. Пошук проводився за ключовими словами «bioconversion», «sludge deposits», «organic fertilizers». Відбиралися публікації з експериментальними даними про ефективність біоконверсії та технологічні параметри процесів. Результати систематизувалися для визначення оптимальних режимів роботи біотехнологічних систем.

Для розробки концептуальної технологічної схеми використовувався системний підхід до аналізу біопроцесів. Класифікація технологічних ризиків проводилася за категоріями: мікробіологічні, хімічні та технічні загрози з оцінкою їх потенційного впливу. Аналіз перспектив впровадження враховував екологічні, агрономічні та економічні аспекти технології біоконверсії мулових відкладів.

Аналіз попередніх досліджень. Проблематика біоконверсії органічних відходів у добрива активно досліджується міжнародною науковою спільнотою протягом останніх двох десятиліть, що обумовлено зростаючими екологічними викликами та потребою у сталому сільськогосподарському виробництві. Інтенсивні аеробні процеси біоконверсії демонструють високу ефективність трансформації органічної речовини з досягненням 67% редукції за 10 діб при використанні термофільних бактеріальних культур *Bacillus thermoamylovorans* за контрольованої температури 60°C [1]. Гідротермальна карбонізація, розроблена польськими дослідниками, забезпечує ефективне вилучення азоту з мулових відкладів з вмістом 6-8% сухої речовини при одночасному збереженні критично важливих фосфорних та азотних

сполук відповідно до вимог Директиви ЄС про добрива [2]. Багатоступеневі анаеробні системи з оптимізацією рН, температури та часу утримання демонструють підвищення продукції метану на 10-30%, при цьому термофільні умови (50-55°C) забезпечують прискорений гідроліз порівняно з мезофільними системами [3].

Розвиток технологій біоконверсії органічних відходів базується на принципах циркулярної економіки, що знайшло відображення у створенні біооснованих добрив як практичного підходу до замкнутого циклу виробництва [2]. Дослідження ефективності різних субстратів показують, що використання золи вугілля як ко-компостуючого матеріалу для мулових відкладів [1] поєднується з оптимізацією параметрів анаеробного зброджування для максимального виходу біогазу [3]. Особливий інтерес представляють технології твердофазної ферментації агровідходів, зокрема застосування ризосферних бактерій *Burkholderia cephalosporia* для створення біоорганічних добрив [4], що доповнюється методологією поверхні відгуку для оптимізації умов ферментації овочевих відходів [5]. Перспективним напрямом є також розробка рідких біодобрив на основі промислових ферментаційних фільтратів з використанням *Bacillus cereus* [6], ефективність яких підтверджується польовими дослідженнями застосування біовугілля в поєднанні з біодобривами у системах вирощування бобових культур [7].

Системний підхід до екологічної безпеки біоконверсії потребує комплексного моніторингу забруднення важкими металами в органічних добривах з урахуванням темпоральних тенденцій [8] та забезпечення безпечного рівня мікроорганізмів у продуктах для систем ґрунт-рослина [9]. Інноваційні методи стабілізації важких металів через біоконверсію з використанням личинок мух та деградацію антибіотиків під час компостування [10] узгоджуються з європейськими стратегіями розвитку біогазових технологій [11]. Українські наукові дослідження формують потужну теоретичну базу для розробки національних технологій біоконверсії, включаючи прогнозування гідроекологічного стану річкових систем [12], комплексний бібліометричний аналіз світових тенденцій у дослідженнях донних відкладів [13] та розробку інноваційних підходів до сталого використання природних ресурсів України [14]. Особливе значення мають дослідження просторової диференціації важких металів в урбанізованих гідроекосистемах [15], біомаркерів стійкості макрофітів до токсичних стресорів військового походження [16], інтегральної оцінки ефективності управління водними ресурсами для сталого розвитку [17], екологічного впливу військових дій на гідромережу з розробкою стратегій відновлення [18], застосування багатовимірних статистичних методів для аналізу кліматичних змін [19] та ідентифікації антропогенних детермінант деградації гідрохімічних показників водних об'єктів [20].

Технології твердофазної ферментації з використанням ризосферних бактерій-стимуляторів росту рослин виявляють винятковий потенціал для біоконверсії седиментних відкладів. Дослідження з *Burkholderia*

cephalosporia, підтверджені повногеномним секвенуванням 7157 кодуєчих послідовностей, оптимізованих для мобілізації поживних речовин, демонструють значне підвищення вмісту азоту та покращення схожості насіння кукурудзи [4]. Статистична оптимізація методом поверхні відгуку з центральним композитним дизайном досягає оптимальних умов ферментації протягом 11-17 діб з 5-15 мл біоактиватора [5], тоді як D-оптимальні методи змішаного дизайну забезпечують отримання $(1,59 \pm 0,01) \cdot 10^8$ КУО/мл за оптимальних умов з комплексними метаболітними профілями, включаючи β -аланіл-L-лізин, ансерин та корисні для рослин сполуки [6]. Польові випробування біоконвертованих добрив у системах лентильно-кукурудзяної ротації демонструють підвищення мікробної біомаси вуглецю на 126% та азоту на 49% при одночасному зниженні еволюції CO₂ на 25% [7].

Комплексні протоколи оцінки ризиків адресують три критичні категорії контамінації в процесах біоконверсії органічних відходів. Аналіз важких металів у 74 комерційних органічних добривах виявив концентраційні діапазони As (1,55-36,95 мг/кг), Cd (0,15-7,49 мг/кг) та Pb (1,43-78,05 мг/кг), при цьому математичні моделі встановлюють максимальні безпечні періоди застосування 20-50 років залежно від концентрацій металів [8]. Протоколи управління патогенами вимагають температурно-часових комбінацій $\geq 50^\circ\text{C}$ протягом 10+ діб або $\geq 60^\circ\text{C}$ протягом 5+ діб для ефективної інактивації *Salmonella* spp., *E. coli* O157:H7 та інших критичних патогенів відповідно до регуляцій Європейської Комісії [9]. Інтегровані підходи біоконверсії, що включають 45-денну біоконверсію личинками мух у поєднанні з аеробним компостуванням, демонструють посилену іммобілізацію важких металів через комплексоутворення з гуміновими кислотами при одночасній деградації тетрациклінів та хінолонів за кінетикою першого порядку [10]. Економічна життєздатність підтверджується австрійськими та німецькими підприємствами, що досягають €180,000 чистого прибутку від переробки 100,000 тонн відходів щорічно з 37% енергетичним відновленням [11].

Аналіз міжнародних наукових досліджень підтверджує високу технологічну зрілість процесів біоконверсії органічних відходів у добрива з доведеною ефективністю трансформації органічної речовини (до 67% редукції за 10 діб) та значними агроекологічними перевагами, включаючи підвищення мікробної біомаси ґрунту на 126% та зниження емісії CO₂ на 25%. Водночас критичними факторами успішної комерціалізації технології є забезпечення мікробіологічної безпеки через контрольовані температурно-часові режими ($\geq 50^\circ\text{C}$ протягом 10+ діб) та управління концентраціями важких металів у межах регуляторних вимог, що разом з економічною життєздатністю (до €180,000 чистого прибутку на 100,000 тонн відходів) формує наукове обґрунтування для розробки вітчизняної технології біоконверсії мулових відкладів меліоративних систем.

Результати дослідження. Сучасні виклики сталого розвитку аграрного сектору актуалізують

необхідність розробки інноваційних підходів до утилізації органічних відходів із одночасним забезпеченням сільського господарства екологічно безпечними добривами. Занедбані меліоративні системи України акумулювали значні обсяги мулу, що представляють собою потенційно цінний ресурс для виробництва органо-мінеральних добрив методом біоконверсії. Розробка наукових основ цього процесу потребує комплексного аналізу характеристик вихідної сировини, оптимізації технологічних параметрів, оцінки перспектив впровадження та ідентифікації технологічних ризиків.

Методологічна основа дослідження базується на системному підході до аналізу біотехнологічного процесу, що включає послідовні етапи від характеристики субстрату до оцінки технологічних ризиків готової технології. Представлена концептуальна модель інтегрує фундаментальні принципи біотехнології, агрохімії та екологічної безпеки для створення науково обґрунтованої технології переробки мулових відкладів.

Ефективність біотехнологічного процесу критично залежить від комплексної характеристики вихідного субстрату, що визначає стратегію технологічного процесу та прогнозує якісні параметри кінцевого продукту (рис. 1). Системний підхід до аналізу мулових відкладів базується на триступеневій ієрархії досліджень, кожен рівень якої вносить специфічний внесок у формування технологічних рішень.

Фізико-хімічна характеристика субстрату формує фундаментальну основу для проектування біореакторних систем та оптимізації масообмінних процесів. Гранулометричний склад відкладів детермінує структурно-механічні властивості субстрату, що безпосередньо корелює з ефективністю кисневого масопереносу та гідродинамічними характеристиками біореакторної системи. Дослідження показують, що оптимальне співвідношення різних фракцій забезпечує створення стійкої пористої структури, необхідної для підтримання аеробних умов біоконверсії.

Водно-фізичні властивості субстрату, характеризовані показниками вологості та щільності, визначають реологічні характеристики біомаси та енергетичні затрати на перемішування. Електрохімічні параметри (рН та електропровідність) відображають іонний склад середовища та його буферну ємність, що критично впливає на метаболічну активність мікробних консорціумів та стабільність біохімічних процесів.

Агрохімічна цінність мулових відкладів визначається балансом макро- та мікроелементів, що формує потенційну ефективність майбутнього добрива. Співвідношення основних біогенних елементів (N:P:K) у поєднанні з комплексом мікроелементів створює передумови для отримання комплексних добрив пролонгованої дії. Водночас присутність важких металів та ксенобіотиків потребує детального токсикологічного аналізу для забезпечення екологічної безпеки кінцевого продукту.

Мікробіологічний профіль субстрату відображає його біологічний потенціал та визначає стратегію біоаугментації процесу. Природні мікробні угруповання мулових відкладів характеризуються високою біорізноманітністю, що створює сприятливі умови для формування стабільних біоценозів у процесі біоконверсії. Однак потенційна присутність патогенних мікроорганізмів актуалізує необхідність розробки ефективних методів біологічної санітації субстрату.

Розробка технологічної схеми біоконверсії базується на принципах контрольованої біоферментації з управлінням ключовими технологічними параметрами для досягнення максимальної ефективності процесу та якості продукту (рис. 2). Технологічна архітектура процесу інтегрує сучасні досягнення біотехнології та інженерії біопроцесів для створення економічно ефективної та екологічно безпечної технології.

Етап підготовки сировини представляє критично важливу фазу технологічного процесу, що визначає ефективність подальших біотрансформацій. Гомогенізація субстрату та створення оптимальної струк-

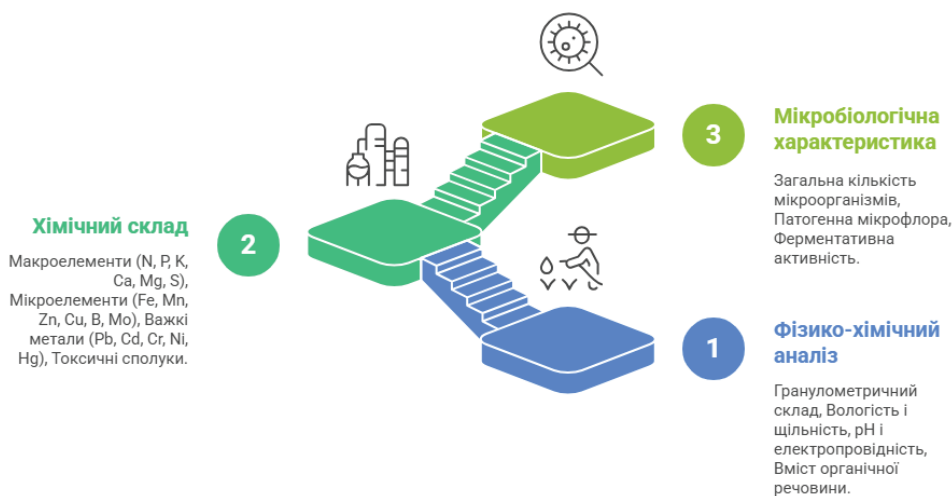


Рис. 1. Триступенева ієрархія досліджень мулових відкладів меліоративних каналів (розроблено авторами)

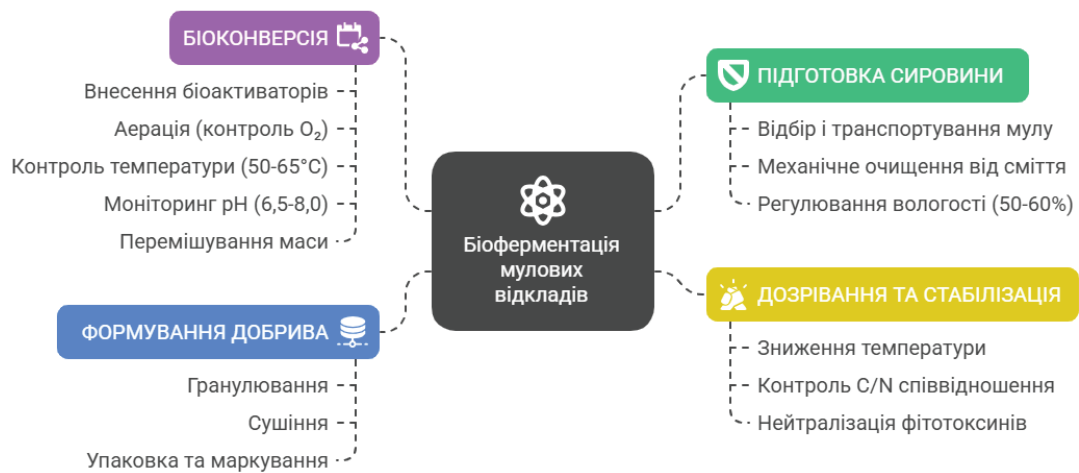


Рис. 2. Технологічна схема біоферментації мулових відкладів у орґано-мінеральні добрива (розроблено авторами)

турно-механічної матриці забезпечують рівномірний розподіл поживних речовин та ефективний масообмін у біореакторній системі. Регулювання вологості до діапазону 50-60% створює оптимальні умови для аеробної біодеградації з мінімізацією ризиків анаеробної ферментації та утворення небажаних метаболітів.

Центральний процес біоферментації реалізується через контрольоване культивування мікробних консорціумів в умовах оптимізованих технологічних параметрів. Стратегія біоаугментації передбачає використання селекційованих штамів мікроорганізмів з високою деструктивною активністю та доведеною безпечністю. Система аерації забезпечує підтримання концентрації розчиненого кисню на рівні, достатньому для повної мінералізації орґанічних сполук та запобігання утворенню анаеробних зон.

Температурний режим біоферментації в діапазоні 50-65°C оптимізує кінетику біохімічних реакцій та забезпечує ефективну санітацію субстрату. Термофільні умови сприяють прискореній деструкції целюлозолігнінового комплексу та елімінації патогенних мікроорганізмів, включаючи вегетативні форми бактерій, віруси та яйця гельмінтів. Контроль pH у лужному діапазоні (6,5-8,0) підтримує оптимальні умови для життєдіяльності целюлолітичних та протеолітичних мікроорганізмів.

Фаза дозрівання та стабілізації характеризується трансформацією продуктів первинної біодеградації у стабільні гумусоподібні сполуки з пролонгованими агрономічними властивостями. Контрольоване зниження температури та досягнення оптимального співвідношення C:N (25-30:1) індикують завершення активної фази біоконверсії та формування агрономічно ефективного продукту. Процеси гуміфікації забезпечують створення стабільних орґано-мінеральних комплексів з підвищеною сорбційною ємністю та катіонообмінними властивостями.

Технологічне завершення процесу включає гранулювання біомаси для покращення фізико-механічних

властивостей добрива та забезпечення його технологічності при внесенні. Контрольоване дегідратування знижує активність води до рівня, що запобігає мікробіологічному псуванню продукту під час зберігання та транспортування.

Комплексна оцінка перспектив впровадження технології біоконверсії виявляє системні синергетичні ефекти, що виходять за межі простої утилізації відходів та створюють передумови для сталого розвитку аграрних територій (рис. 3). Інтеграція екологічних, агрономічних та економічних переваг формує мультиплікативний ефект, що значно перевищує суму окремих компонентів.

Екологічна ефективність технології реалізується через трансформацію екологічного навантаження у ресурсний потенціал, що відповідає принципам циркулярної економіки. Біоконверсія мулових відкладів ліквідує накопичені орґанічні забруднення меліоративних систем, відновлюючи їх функціональну ефективність та екосистемні сервіси. Регенерація меліоративної інфраструктури забезпечує відновлення гідрологічного режиму території, що особливо актуально в умовах кліматичних змін та дефіциту водних ресурсів.

Заміщення мінеральних добрив біоконвертованими аналогами знижує антропогенне навантаження на агро-екосистеми та зменшує ризики евтрофікації водних об'єктів. Орґано-мінеральні добрива характеризуються пролонгованою дією та мінімальними втратами поживних речовин через інфільтрацію та поверхневий стік, що підвищує екологічну безпеку агротехнологій.

Агрономічні переваги технології базуються на комплексному впливі біоконвертованих добрив на родючість ґрунтів та продуктивність агроценозів. Внесення стабілізованої орґанічної речовини покращує агрегатну структуру ґрунту, підвищує його водоутримуючу здатність та аерацію кореневої зони. Формування орґано-мінеральних комплексів збільшує катіонообмінну ємність ґрунту та покращує доступність поживних речовин для рослин.



Рис. 3. Агроекологічні та економічні перспективи впровадження біоконверсії мулових відкладів (розроблено авторами)

Пролонгована дія біоконвертованих добрив забезпечується поступовим вивільненням поживних речовин у результаті мікробіологічної деструкції органічних комплексів, що синхронізується з потребами рослин у різні фази вегетації. Це знижує ризики перегноювання культур та мінімізує втрати елементів живлення з агро-екосистеми.

Економічна ефективність проєкту формується через низьку собівартість вихідної сировини та високу додану вартість кінцевого продукту. Мулові відклади меліоративних систем практично безкоштовні та одночасно представляють проблему, вирішення якої має додаткову економічну цінність. Створення локальних виробництв біоконвертованих добрив генерує нові робочі місця в сільській місцевості та сприяє соціально-економічному розвитку територій.

Імпортозаміщення мінеральних добрив підвищує продовольчу безпеку країни та знижує залежність аграрного сектору від кон'юнктури світових ринків. Локалізація виробництва добрив знижує логістичні витрати та забезпечує оперативну доставку продукції споживачам.

Ідентифікація та оцінка технологічних ризиків біоконверсії є критично важливою для розробки надійної та безпечної технології промислового масштабу (рис. 4). Системний аналіз потенційних загроз дозволяє розробити комплексну стратегію управління ризиками з превентивною орієнтацією.

Мікробіологічні ризики представляють найбільш критичну категорію загроз через їх безпосередній вплив на безпечність процесу та якість продукції. Контамінація патогенними мікроорганізмами може трансформувати корисний продукт у джерело біологічної небезпеки. Стратегія мікробіологічного контролю базується на принципах HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Points)

з ідентифікацією критичних контрольних точок та встановленням критичних меж для ключових параметрів.

Термічна санітація субстрату в діапазоні 50-65°C забезпечує елімінацію вегетативних форм патогенів, однак потребує додаткових заходів для інактивації спорових форм бактерій. Контрольована аерація запобігає створенню анаеробних зон, що могли б сприяти розвитку патогенних анаеробних мікроорганізмів, включаючи збудників ботулізму та газової гангрені.

Неповна біоконверсія органічних субстратів може призводити до накопичення фітотоксичних сполук, включаючи органічні кислоти, аміак та інші метаболіти неповної деструкції. Моніторинг біохімічних маркерів завершення процесу, включаючи співвідношення C:N, pH та концентрацію аміачного азоту, дозволяє об'єктивно оцінити ступінь зрілості продукту.

Хімічні ризики пов'язані з потенційною концентрацією токсичних сполук у процесі біоконверсії та можливими хімічними трансформаціями вихідних забруднювачів. Біоаккумуляція важких металів у мікробній біомасі може призводити до їх концентрування у кінцевому продукті. Стратегія детоксикації включає попередню обробку субстрату методами хімічного осадження, біосорбції або фітореMediaції.

Втрати поживних речовин через волатилізацію азотних сполук, денітрифікацію або вимивання знижують агрономічну цінність продукту та погіршують економічні показники процесу. Оптимізація технологічних параметрів, включаючи систему аерації, водний режим та pH, мінімізує ці втрати та забезпечує максимальне збереження елементів живлення.

Технічні ризики охоплюють аспекти технологічної надійності та масштабованості процесу. Нестабільність біологічного процесу може призводити до значних



Рис. 4. Класифікація технологічних ризиків біоконверсії та методи їх превентивного усунення (розроблено авторами)

коливань якості продукції та економічних втрат. Впровадження автоматизованих систем контролю з використанням сучасних сенсорних технологій забезпечує реал-тайм моніторинг критичних параметрів та оперативну корекцію технологічного режиму.

Енергетичні витрати на аерацію, перемішування та термостатування можуть становити значну частку операційних витрат. Стратегія енергетичної оптимізації включає рекуперацію тепла біологічних процесів, використання відновлювальних джерел енергії та впровадження енергоефективних технологій.

Сезонна варіабельність доступності сировини створює ризики для безперервності виробничого процесу. Диверсифікація джерел мулових відкладів, створення буферних запасів та розробка технологій консервації субстрату забезпечують стабільність сировинної бази.

Інтегрована система управління ризиками базується на принципах превентивного контролю з мультирівневою архітектурою безпеки. Постійний моніторинг біологічних, хімічних та фізичних параметрів процесу забезпечує раннє виявлення відхилень та оперативне прийняття корегувальних заходів. Стандартизація операційних процедур та систематична підготовка персоналу мінімізують ризики, пов'язані з людським фактором.

Системний аналіз перспектив та ризиків біоконверсії мулових відкладів занедбаних меліоративних систем демонструє високий потенціал цієї технології для сталого розвитку аграрного сектору. Комплексний підхід до характеристики субстрату, оптимізації технологічних параметрів та управління ризиками створює наукове підґрунтя для розробки промислово масштабованої технології виробництва органо-мінеральних добрив.

Синергетичні ефекти впровадження технології, що поєднують екологічні, агрономічні та економічні переваги, формують передумови для створення економічно ефективних та екологічно безпечних виробництв. Превентивна стратегія управління технологічними ризи-

ками забезпечує надійність процесу та безпечність продукції, що є критично важливим для комерціалізації технології.

Подальші дослідження будуть зосереджені на оптимізації мікробних консорціумів для специфічних типів мулових відкладів, розробці енергоефективних технологічних рішень та створенні адаптивних систем управління біопроцесами для різних кліматичних умов.

Висновки. Мулові відклади занедбаних меліоративних систем є перспективною сировиною для виробництва органо-мінеральних добрив завдяки високому вмісту органічної речовини та комплексу біогенних елементів (N, P, K та мікроелементів). Їх утилізація дозволяє одночасно вирішувати екологічну проблему накопичення відходів і створювати цінний агрономічний продукт.

Проведені дослідження зарубіжних авторів підтверджують, що термофільні умови (50–65°C), оптимальна вологість (50–60%), контроль pH (6,5–8,0) та рівномірний розподіл субстрату забезпечують інтенсивну мінералізацію органічної речовини, ефективну санітарну обробку та формування стабільних органо-мінеральних комплексів з пролонгованою дією.

Впровадження біоконверсії сприяє заміщенню мінеральних добрив, зниженню ризику евтрофікації водних об'єктів, відновленню гідрологічного режиму меліоративних систем, покращенню структури та водоутримуючої здатності ґрунтів, а також забезпечує поступове вивільнення поживних речовин відповідно до потреб рослин.

Технологія має високу економічну привабливість через безкоштовну або низьковартісну сировину, можливість створення локальних виробництв, зниження залежності від імпорту добрив та формування доданої вартості. Це забезпечує зростання прибутковості агро-виробництва та розвиток сільських територій.

Серед основних ризиків – мікробіологічна контамінація, накопичення важких металів, утворення

фітотоксичних сполук, енергетичні витрати та сезонна нерівномірність надходження сировини. Рекомендовано впроваджувати НАССР, автоматизовані системи моніторингу та енергоефективні технології, а також створювати буферні запаси субстрату.

Подальші роботи мають бути спрямовані на вдосконалення мікробних консорціумів для специфічних типів мулових відкладів, розробку адаптивних технологій під різні кліматичні умови та інтеграцію процесів біоконверсії у стратегії циркулярної економіки.

Література:

1. Wong J.W.C., Fang M., Li G.X., Wong M.H. Feasibility of using coal ash residues as co-composting materials for sewage sludge // *Environmental Technology*. 2002. Vol. 23. Issue 10. P. 1117-1124. DOI: 10.1080/09593332308618312
2. Chojnacka K., Moustakas K., Witek-Krowiak A. Bio-based fertilizers: A practical approach towards circular economy // *Bioresource Technology*. 2020. Vol. 295. 122223. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122223
3. Negi S., Dhar H., Kumar S., Singh S. Optimization of anaerobic digestion parameters for enhanced biogas production: A comprehensive review // *Water*. 2024. Vol. 16. Issue 3. 412. DOI: 10.3390/w16030412
4. Arshad M., Ali I., Rasheed R., Bahadur S., Ahmad M., Mahmood T., Hussain A. Formulation and efficacy testing of bio-organic fertilizer produced through solid-state fermentation of agro-waste by *Burkholderia cenocepacia* // *Microorganisms*. 2021. Vol. 9. Issue 11. 2360. DOI: 10.3390/microorganisms9112360
5. Sari D.K., Hidayat N., Fajriah S., Wijaya A. Optimization of fermentation condition to produce liquid organic fertilizer (LOF) from rotten vegetable waste using response surface methodology // *Chemical Engineering and Technology*. 2023. Vol. 46. Issue 7. P. 1425-1432. DOI: 10.1002/ceat.202200585
6. Huang Z., Li Y., Chen B., Su S., Zhang W. Recovery and utilization of waste filtrate from industrial biological fermentation: Development and metabolite profile of the *Bacillus cereus* liquid bio-fertilizer // *Journal of Biotechnology*. 2023. Vol. 363. P. 28-38. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2023.01.008
7. Ahmad I., Zhu G., Zhou G., Liu M., Ahmad S., Murad W., Stokes C.E., Ahmad A., Habib A. Biochar particle size coupled with biofertilizer enhances soil carbon-nitrogen microbial pools and CO₂ sequestration in lentil // *Frontiers in Environmental Science*. 2023. Vol. 11. 1114728. DOI: 10.3389/fenvs.2023.1114728
8. Su C., Liu K., Zhang H., Chang S.X., Fang Y. Heavy metal contamination in organic fertilizers: Risk assessment and temporal trends (2000-2022) // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. 1355. DOI: 10.1038/s41598-025-85025-1
9. Vassileva M., Flor-Peregrin E., Malusá E., Requena N.E. Safety level of microorganism-bearing products applied in soil-plant systems // *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. 862875. DOI: 10.3389/fpls.2022.862875
10. Lu J., Wang H., Zhang C., Zhao G., Zhang Q. Housefly larva bioconversion enhances heavy metal stabilization and antibiotic degradation during chicken manure composting // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. 1267. DOI: 10.1038/s41598-025-85267-3
11. Scarlat N., Dallemand J.F., Fahl F. Biogas: Developments and perspectives in Europe // *Renewable Energy*. 2018. Vol. 129. P. 457-472. DOI: 10.1016/j.renene.2018.03.006
12. Циганенко-Дзюбенко І.Ю., Кірейцева Г.В., Скиба Г.В. Прогнозування гідроекологічного стану річки Тетерів з використанням модифікованої моделі Стрітера-Фелпса. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, 2025. № 1(75). С. 53-64. DOI: 10.17721/2306-5680.2025.1.6
13. Циганенко-Дзюбенко І.Ю., Кірейцева Г.В., Хамдош І.Н., Вовк В.М. Бібліометричний аналіз світових досліджень донних відкладів: тенденції публікацій та напрями розвитку седиментології. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, 2025. № 2(76). С. 6-20. DOI: 10.17721/2306-5680.2025.2.1
14. Kapelista I., Kireitseva H., Tsyhanenko-Dziubenko I., Khomenko S., Vovk V. Review of Innovative Approaches for Sustainable Use of Ukraine's Natural Resources. *Grassroots Journal of Natural Resources*. 2024. Vol. 7, No. 3. P. 378-395. DOI: 10.33002/nr2581.6853.0703ukr19
15. Tsyhanenko-Dziubenko I., Kireitseva H., Shomko O., Gandziura V., Khamdosh I. Analytical assessment of heavy metals polyelement distribution in urbanized hydroecosystem components: spatial differentiation and migration patterns. *Journal Environmental Problems*. 2025. Vol. 10, No. 2. P. 135-144. DOI: 10.23939/ep2025.02.135
16. Tsyhanenko-Dziubenko I., Kireitseva H., Fonseca Araújo J. Physiological and biochemical biomarkers of macrophyte resilience to military-related toxic stressors. *Journal Environmental Problems*. 2024. Vol. 9, No. 4. P. 227-234. DOI: 10.23939/ep2024.04.227
17. Kireitseva H., Tsyhanenko-Dziubenko I., Khomenko S., Palii O. Integral assessment of the effectiveness of water resource management in communities for sustainable development. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*. 2025. Vol. 16, No. 1. P. 27-38. DOI: 10.69628/esbur/1.2025.27
18. Кірейцева Г.В., Циганенко-Дзюбенко І.Ю. Екологічна оцінка впливу військових дій на гідромережу Київської області та стратегії відновлення водних екосистем. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. 2025. № 1 (499). С. 199-207. DOI: 10.15589/znp2025.1(499).28
19. Кірейцева Г.В., Циганенко-Дзюбенко І.Ю., Хоменко С.В., Легенчук Р.В. Застосування багатовимірних статистичних методів для аналізу кліматичних проєкцій. *Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2025. № 3. С. 26-33. DOI: 10.32782/3041-2080/2025-3-3
20. Кірейцева Г.В., Циганенко-Дзюбенко І.Ю. Антропогенні детермінанти деградації гідрохімічних показників водних об'єктів. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Том 349, № 2. С. 540-548. DOI: 10.31891/2307-5732-2025-349-80

References:

1. Wong, J. W. C., Fang, M., Li, G. X., & Wong, M. H. (2002). Feasibility of using coal ash residues as co-composting materials for sewage sludge. *Environmental Technology*, 23(10), 1117-1124. <https://doi.org/10.1080/09593332308618312>

2. Chojnacka, K., Moustakas, K., & Witek-Krowiak, A. (2020). Bio-based fertilizers: A practical approach towards circular economy. *Bioresource Technology*, 295, 122223. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122223>
3. Negi, S., Dhar, H., Kumar, S., & Singh, S. (2024). Optimization of anaerobic digestion parameters for enhanced biogas production: A comprehensive review. *Water*, 16(3), 412. <https://doi.org/10.3390/w16030412>
4. Arshad, M., Ali, I., Rasheed, R., Bahadur, S., Ahmad, M., Mahmood, T., & Hussain, A. (2021). Formulation and efficacy testing of bio-organic fertilizer produced through solid-state fermentation of agro-waste by *Burkholderia cenocepacia*. *Microorganisms*, 9(11), 2360. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9112360>
5. Sari, D. K., Hidayat, N., Fajriah, S., & Wijaya, A. (2023). Optimization of fermentation condition to produce liquid organic fertilizer (LOF) from rotten vegetable waste using response surface methodology. *Chemical Engineering and Technology*, 46(7), 1425-1432. <https://doi.org/10.1002/ceat.202200585>
6. Huang, Z., Li, Y., Chen, B., Su, S., & Zhang, W. (2023). Recovery and utilization of waste filtrate from industrial biological fermentation: Development and metabolite profile of the *Bacillus cereus* liquid bio-fertilizer. *Journal of Biotechnology*, 363, 28-38. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2023.01.008>
7. Ahmad, I., Zhu, G., Zhou, G., Liu, M., Ahmad, S., Murad, W., Stokes, C. E., Ahmad, A., & Habib, A. (2023). Bio-char particle size coupled with biofertilizer enhances soil carbon-nitrogen microbial pools and CO₂ sequestration in lentil. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1114728. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1114728>
8. Su, C., Liu, K., Zhang, H., Chang, S. X., & Fang, Y. (2025). Heavy metal contamination in organic fertilizers: Risk assessment and temporal trends (2000-2022). *Scientific Reports*, 15, 1355. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-85025-1>
9. Vassileva, M., Flor-Peregrin, E., Malusá, E., & Requena, N. E. (2022). Safety level of microorganism-bearing products applied in soil-plant systems. *Frontiers in Plant Science*, 13, 862875. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.862875>
10. Lu, J., Wang, H., Zhang, C., Zhao, G., & Zhang, Q. (2025). Housefly larva bioconversion enhances heavy metal stabilization and antibiotic degradation during chicken manure composting. *Scientific Reports*, 15, 1267. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-85267-3>
11. Scarlat, N., Dallemand, J. F., & Fahl, F. (2018). Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy*, 129, 457-472. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.006>
12. Tsyhanenko-Dziubenko, I. Yu., Kireitseva, H. V., & Skyba, H. V. (2025). Prognozuvannia hidro-ekolohichnoho stanu richky Teteriv z vykorystanniam modyfikovanoi modeli Stritera-Felpsa [Prediction of hydroecological state of the Teteriv River using modified Streeter-Phelps model]. *Hidrolohiiia, hidrokhimiiia i hidroekolohiiia* [Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology], 1(75), 53-64. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2025.1.6>
13. Tsyhanenko-Dziubenko, I. Yu., Kireitseva, H. V., Khamdosh, I. N., & Vovk, V. M. (2025). Bibliometrychnyi analiz svitovykh doslidzhen donnykh vidkladiv: tendentsii publikatsii ta napriamy rozvytku sedymentolohii [Bibliometric analysis of global sediment research: Publication trends and development directions in sedimentology]. *Hidrolohiiia, hidrokhimiiia i hidroekolohiiia* [Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology], 2(76), 6-20. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2025.2.1>
14. Kapelista, I., Kireitseva, H., Tsyhanenko-Dziubenko, I., Khomenko, S., & Vovk, V. (2024). Review of innovative approaches for sustainable use of Ukraine's natural resources. *Grassroots Journal of Natural Resources*, 7(3), 378-395. DOI: 10.33002/nr2581.6853.0703ukr19
15. Tsyhanenko-Dziubenko, I., Kireitseva, H., Shomko, O., Gandziura, V., & Khamdosh, I. (2025). Analytical assessment of heavy metals polyelement distribution in urbanized hydroecosystem components: spatial differentiation and migration patterns. *Journal Environmental Problems*, 10(2), 135-144. DOI: 10.23939/ep2025.02.135
16. Tsyhanenko-Dziubenko, I., Kireitseva, H., & Fonseca Araújo, J. (2024). Physiological and biochemical biomarkers of macrophyte resilience to military-related toxic stressors. *Journal Environmental Problems*, 9(4), 227-234. DOI: 10.23939/ep2024.04.227
17. Kireitseva, H., Tsyhanenko-Dziubenko, I., Khomenko, S., & Palii, O. (2025). Integral assessment of the effectiveness of water resource management in communities for sustainable development. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*, 16(1), 27-38. DOI: 10.69628/esbur/1.2025.27
18. Kireitseva, H. V., & Tsyhanenko-Dziubenko, I. Yu. (2025). Ekolohichna otsinka vplyvu viiskovykh dii na hidromerezhu Kyivskoi oblasti ta stratehii vidnovlennia vodnykh ekosystem [Ecological assessment of military actions impact on the hydrographic network of Kyiv region and strategies for aquatic ecosystems restoration]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia imeni admirala Makarova* [Collection of Scientific Papers of Admiral Makarov National University of Shipbuilding], 1(499), 199-207. DOI: 10.15589/znp2025.1(499).28
19. Kireitseva, H. V., Tsyhanenko-Dziubenko, I. Yu., Khomenko, S. V., & Lehenchuk, R. V. (2025). Zastosuvannia bahatovymirnykh statystychnykh metodiv dlia analizu klimatychnykh proektsii [Application of multidimensional statistical methods for climate projections analysis]. *Naukovyi Zhurnal Metinvest Politekhniky. Serii: Tekhnichni nauky* [Scientific Journal of Metinvest Polytechnica. Technical Sciences], 3, 26-33. DOI: 10.32782/3041-2080/2025-3-3
20. Kireitseva, H. V., & Tsyhanenko-Dziubenko, I. Yu. (2025). Antropohenni determinanty dehradatsii hidrokhimichnykh pokaznykiv vodnykh ob'ektiv [Anthropogenic determinants of degradation of hydrochemical indicators of water bodies]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky* [Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences], 349(2), 540-548. DOI: 10.31891/2307-5732-2025-349-80

Дата першого надходження рукопису до видання: 25.08.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 29.09.2025

Дата публікації: 31.10.2025